Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Investigation and comparison of the performance of air-air and hydrogen-air flat membrane humidifiers for use in polymer fuel cells *

Research Article

Seyed Morteza Mousavi Zahed [1], Ebrahim Afshari[2]

10.22067/jacsm.2025.90687.1297

***Abstract*--One of the methods of water management in PEM fuel cells is the humidification of gases, which has a great impact on the performance of the fuel cell. In this study, modeling of a membrane humidifier with moist air and for two gases, hydrogen and air on the dry side by ansys fluent. The equations of mass, momentum, energy and components have been discrete by finite volume method and solved by the simple method. Also effect of the flow rate on the dry and wet side on the moisture percentage of the dry side output, temperature dew point, water transfer rate and water recycling ratio were investigated. The results show in a constant flow on the dry side, if the wet side mass flow rate is 1.1 g/s, the dry side outlet moisture, water transfer rate and water recovery ratio in hydrogen are about 4%, 0.4% and 0.5% higher. Also that in a constant flow on the wet side, with an increase in the flow on the dry side, the dew point temperature difference in hydrogen and air decreases and the transfer rate and water recycling ratio increase. In a constant flow rate on the dry side, with an increase in the flow rate on the wet side, the dew point temperature difference in hydrogen and air increases and the transfer rate and water recycling ratio decrease. The results generally show that the efficiency of hydrogen air humidifier is higher than that of air.**

***Key Words.* Membrane humidifier, fuel cell, heat transfer, relative humidity, water transfer ratio.**

1- Introduction

Water management has a significant impact on fuel cell performance. Low water levels inside the cell cause the ionic conductivity of the membrane to decrease. There are various methods for humidifying gases, each with its own advantages and disadvantages [1]. Humidification methods are usually classified into two categories: internal and external humidification. The difference in water concentration and pressure on both sides of the membrane causes water to pass through the membrane surface and, at the interface between the membrane and the dry channels, causes evaporation and humidification of the gases on the dry side. A cyclic system can be used to humidify the air, in such a way that the humid air entering the humidifier is the same air exiting the cathode of the polymer membrane fuel cell, which has been humidified due to the production of water on the cathode side [2]. Many studies have been conducted in the field of modeling membrane humidifiers. Florian Wolfenstetter et al [3]. studying different membranes in a humidifier, concluded that relative humidity has the greatest effect on water penetration through the membrane. Increasing temperature also reduces water absorption by the membrane. Chen et al [4] investigated a plate membrane humidifier numerically and experimentally. They found that by increasing the wet side temperature from 50 to 80°C, the outlet gas temperature increased and the membrane vapor transfer rate tripled. Previous studies have examined air humidifiers; in this study, the heat and moisture transfer of a hydrogen plate humidifier is addressed. Also, the effective parameters (dew point temperature at the dry side outlet, water transfer rate through the membrane, moisture recovery ratio) on the performance of the membrane humidifier in fuel cell application have been investigated and with the help of numerical modeling of these two humidifiers, their performance at different flow rates on the dry and wet sides has been compared.

2- Modeling

A schematic of a membrane humidifier modeled with parallel channels is shown in Figure (1). According to Figure (1); a cold, dry stream and a warm, moist stream are passed through channels located on the sides of the membrane. Due to the difference in temperature, concentration, and pressure on both sides of the membrane, mass (water) and energy (heat) transfer occurs from the hot and wet channels and through the membrane to the cold and dry channels.

3- Equations

Flow is Incompressible, Re<2300, Fully developed and Air

* Manuscript received November 8, 2024. Revised November 20, 2024, Accepted February 5, 2025.

[1] PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan

[2] Corresponding author. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan.
Email: e.afshari@eng.ui.ac.ir

is the ideal gas. The membrane is homogeneous and only passes water vapor. Based on the above assumptions, the equations governing membrane humidifiers include the conservation equations of mass, momentum, energy, and species.

4- Validation

To ensure the numerical solution method, one of the important parameters in the humidifier must be investigated. According to Figure (2), the output temperature of the dry side has been compared with the numerical results of Chen and Peng's study[4]. In the different discharges of the dry side shown, there is a good agreement between the present study and the results of Chen and Peng and indicates the correctness of the solution process. The results show that the highest percentage of error is 0.9%.

5- Results

Figure (3) shows the pressure drop in the dry-side channels of the air-air humidifier and the hydrogen humidifier with dry and wet gas temperatures of 300 and 330 K with a flow rate of 30 mg/s, respectively. In the lower discharge, the pressure drop is 27 Pa, and in the higher discharges, it reaches 120 Pa.

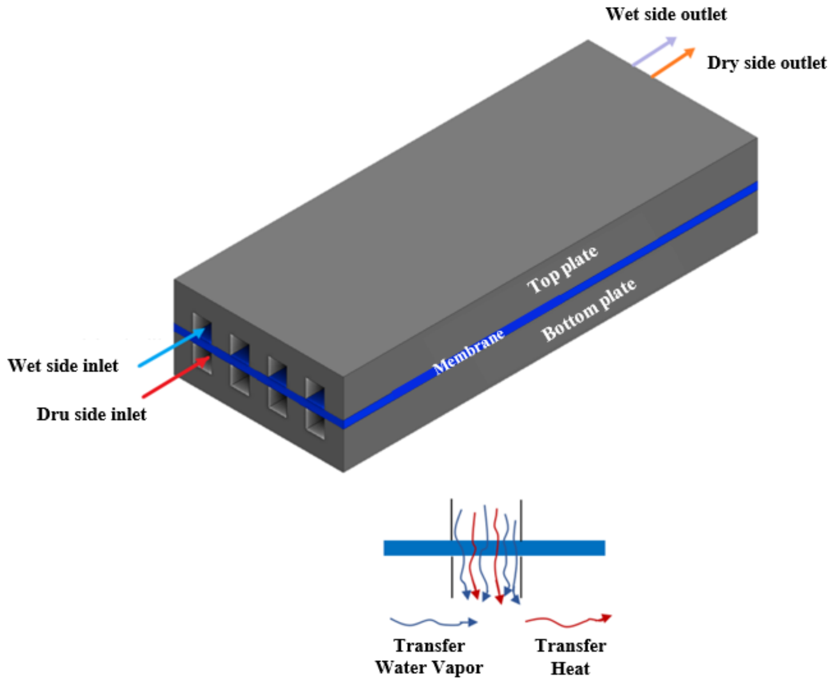


Fig. 1. A schematic of a modeled humidifier

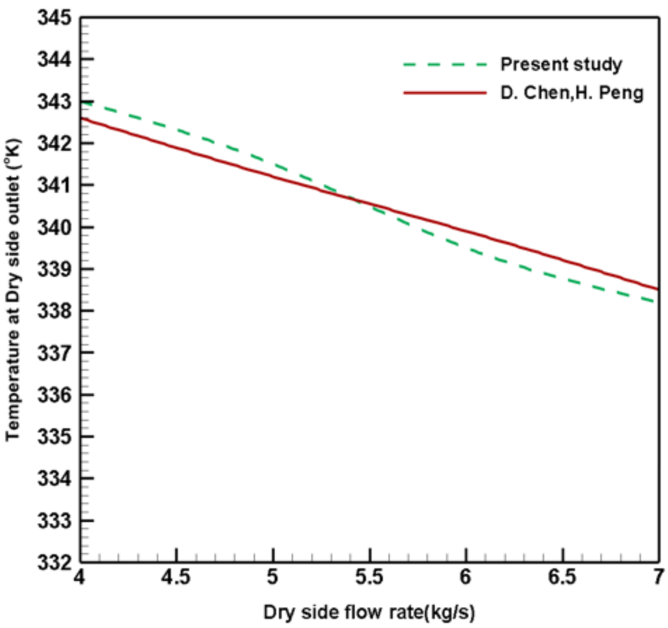


Fig. 2. Comparison of output temperature changes on dry side

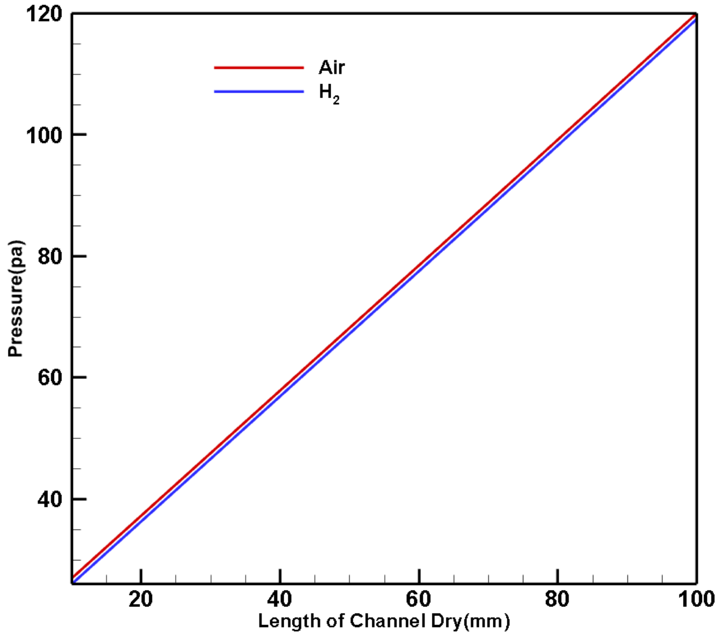


Fig. 3. Pressure Drop in the Dry Side Channels of Air-Air Humidifier and Air Hydrogen Humidifier

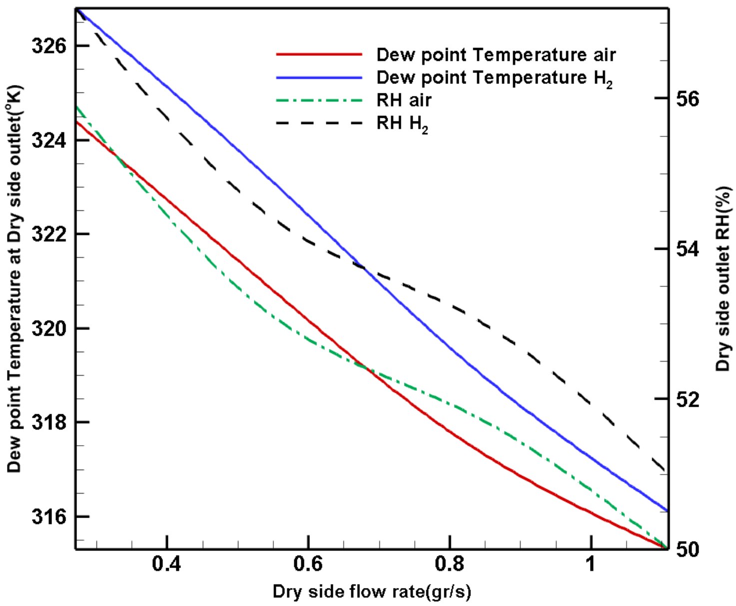


Fig. 4. The effect of dry side discharge on dew point temperature and output relative humidity

Figure (4) shows the effect of dry side discharge on dew point temperature and relative humidity percentage of dry side output at a constant wet side discharge in a membrane humidifier. Figure (4) shows the effect of dry side discharge on dew point temperature and relative humidity percentage of dry side output at a constant wet side discharge in a humidifier.

6- Conclusion

1) Due to the long path of the canals, the lowest and highest pressure drops of 27 and 120 Pa are related to the beginning and end of the canals.
2) At a constant flow rate on the wet side, with the increase in the flow rate on the dry side, the dew point temperature and outlet humidity in the hydrogen air humidifier are higher than in the air humidifier. The highest temperature of the dew point and the outlet humidity are equal to 2 K and 4%, respectively.

References

[1] J. Kim, S. Kim, H. Chun, J. Sim, S.-Y. Woo, S. Kang, and K. Min, "Comprehensive analysis of polysulfone membrane humidifier in hydrogen fuel cell vehicles: Experimental and theoretical approaches," *Journal of Membrane Science*, vol. 713, p. 123234, 2025.

https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123234

[2] B. J. Kim and M. S. Kim, “Studies on the cathode humidification by exhaust gas recirculation for PEM fuel cell,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 5, pp. 4290–4299, 2012. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.103

[3] F. Wolfenstetter, M. Kreitmeir, L. Schoenfeld, H. Klein, M. Becker, and S. Rehfeldt, “Experimental study on water transport in membrane humidifiers for polymer electrolyte membrane fuel cells,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 55, pp. 23381–23392, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.114

[4] D. Chen and H. Peng, “A thermodynamic model of membrane humidifiers for PEM fuel cell humidification control,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 127, no. 3, pp. 424–432, 2005. https://doi.org/10.1115/1.1978910

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک،۳۷، ۳، ۱۴۰۴. (۹۴-۷۹)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

بررسی و مقایسه عملکرد مرطوب‌ساز تخت غشایی هوا - هوا و هوا - هیدروژن جهت استفاده در پیل سوختی پلیمری*

مقاله پژوهشی

سید مرتضی موسوی زاهد (۱) ابراهیم افشاری (۲)

DOI: 10.22067/jacsm.2025.90687.1297

چکیده یکی از روش‌های مناسب مدیریت آب در پیل‌سوختی غشا پلیمری، مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر است که تاثیر زیادی بر عملکرد پیل‌سوختی دارد. این مقاله، به مدل‌سازی سه بعدی مرطوب ساز غشایی برای دو گاز هیدروژن و هوا در سمت خشک و هوای مرطوب در سمت مرطوب توسط نرم‌افزار انسیس فلوئنت پرداخته است. معادلات بقا جرم، مومنتوم، انرژی و اجزا به روش حجم محدود گسسته‌سازی شده و با روش سیمپل حل شده است. همچنین تاثیر دبی سمت خشک و مرطوب بر درصد رطوبت خروجی سمت خشک، دمای نقطه شبنم، نرخ انتقال آب و نسبت بازیافت آب بررسی و عملکرد مرطوب‌سازهای هوا - هوا و هوا - هیدروژن مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند در یک دبی ثابت سمت خشک، اگر دبی سمت مرطوب ۱/۱ گرم بر ثانیه باشد؛ رطوبت خروجی سمت خشک، نرخ انتقال آب و نسبت بازیافت آب مرطوب‌ساز هوا - هیدروژن نسبت به هوا - هوا به ترتیب حدود ۴ درصد، ۰/۴ و ۰/۵ بیشتر است. همچنین در یک دبی ثابت سمت مرطوب، با افزایش دبی سمت خشک، اختلاف دمای نقطه شبنم در هیدروژن و هوا کاهش و نرخ انتقال و نسبت بازیافت آب افزایش می‌یابد. همچنین، در یک دبی ثابت در سمت خشک با افزایش دبی سمت مرطوب، اختلاف دمای نقطه شبنم در هیدروژن و هوا افزایش و نرخ انتقال و نسبت بازیافت آب کاهش می‌یابد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که راندمان مرطوب‌ساز هوا - هیدروژن بالاتر از هوا - هوا است.

واژه های کلیدی مرطوب‌ساز غشایی، پیل سوختی، انتقال حرارت، رطوبت نسبی، نسبت انتقال آب.

مقدمه

مدیریت آب تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد پیل‌سوختی دارد. پایین بودن سطح آب داخل پیل، باعث می‌شود رسانایی یونی غشا کاهش یابد. از طرفی افزایش بیش از حد سطح آب در کاتد پیل‌سوختی، باعث پرشدن لایه نفوذی گاز شده و مقاومت در مقابل نفوذ گاز اکسیژن به لایه کاتالیست کاتد افزایش می‌یابد که به این پدیده غرقاب شدگی می‌گویند [1,2]. غرقاب شدگی در پیل‌سوختی باعث کاهش نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی و کاهش عملکرد پیل سوختی می‌شود. غرقاب شدگی عموما در دما و چگالی جریان کم در آند و در چگالی جریانهای بالا در کاتد واقع می‌شود. یکی از روش‌های کنترل آب در پیل‌سوختی مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر قبل از ورود به پیل سوختی است. بدون مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر پیل‌سوختی، راندمان پیل سوختی پلیمری بین ۲۰ تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد [3]. برای مرطوب‌سازی گازها روش‌های گوناگونی وجود دارد که هر یک مزیت‌ها و معایب خود را دارند. روش‌های مرطوب‌سازی معمولا به دو دسته مرطوب‌سازی داخلی و خارجی دسته‌بندی می‌شود. استفاده از مکمل‌های غشایی [4]، تزریق مستقیم آب مایع و یا بخار [5] مرطوب‌سازی به روش داخلی می‌باشد. مرطوب‌ساز حبابی و یا نقطه شبنم [6]، چرخ آنتالپی [7] و غشایی [8]

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۸/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۱/۱۷ می باشد.

(۱) دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان.

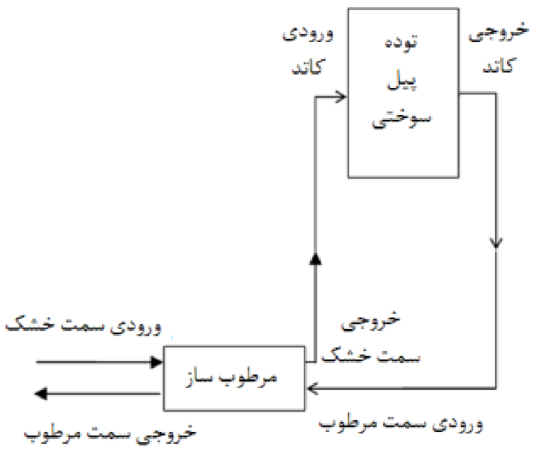
Email: e.afshari@eng.ui.ac.ir

مرطوب‌سازی به روش خارجی است. در میان روش‌های مرطوب‌سازی، روش مرطوب‌سازی غشایی ضمن سادگی باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی شده و کارایی پیل سوختی را افزایش می‌دهد [8]. در جدول (۱) روش‌های مختلف مرطوب‌سازی متداول با روش غشایی مقایسه شده است.

جدول ۱ مقایسه برخی روش‌های مرطوب‌سازی

روش	مزیت	معایب
تزریق آب مایع	ایجاد نرخ انتقال بالاتر واکنش‌دهنده‌ها در لایه کاتالیست افزایش رسانایی غشا	نیازمند به پمپ برای تزریق هزینه بالا
مرطوب‌ساز حبابی	کنترل مقدار رطوبت زنی عدم انتقال مایع در دبی گاز بالا	راندمان پایین دقت پایین کنترل‌پذیری پایین
چرخ آنتالپی	افت فشار کم	هزینه بالا مصرف توان الکتریکی داشتن قطعه متحرک
غشایی	افت فشار کم راندمان بالا کاهش حجم و وزن نداشتن قطعه متحرک	هزینه بالا

اختلاف غلظت و فشار آب در دو طرف غشا باعث عبور آب از سطح غشا شده و در روی سطح مشترک غشا و کانال‌های خشک باعث تبخیر و مرطوب‌سازی گازهای سمت خشک می‌شود. استفاده از گرما و آب تولیدی پیل‌سوختی در مرطوب‌ساز، باعث کاهش حجم و وزن و سیستم‌های جانبی پیل‌سوختی می‌شود. در روش غشایی اختلاف فشار به دلیل عدم وجود نازل در سیستم‌های پاشش آب وجود ندارد که باعث برتری این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌شود. از مهمترین عیب‌های استفاده از این روش می‌توان به عدم کنترل مرطوب‌سازی گازها اشاره کرد. از نظر ظاهری مرطوب‌سازهای غشایی به دو دسته پوسته – لوله‌ای و صفحه‌ای تقسیم می‌شود [9]. از نظر آرایش کانال‌های عبوردهنده جریان، مرطوب‌سازهای غشایی به سه دسته جریان هم‌سو، جریان مخالف و جریان متقاطع دسته‌بندی می‌شود و مطالعات گذشته نشان می‌دهد که بیشترین بازده مرطوب‌ساز با آرایش جریان مخالف است [10]. برای مرطوب‌سازی هوا می‌توان از یک سیستم چرخه‌ای استفاده کرد؛ به گونه‌ای که هوای مرطوب ورودی به مرطوب‌ساز همان هوای خروجی از کاتد پیل‌سوختی غشاپلیمری است که به علت تولید آب در سمت کاتد، مرطوب شده است. هوای ورودی به کاتد یا آند پیل، همان هوای مرطوب شده خروجی از مرطوب‌ساز است [11]. این چرخه برای هوا قابل اجرا و برای هیدروژن قابل اجرا نیست؛ مگر این‌که از هوای مرطوب خروجی برای مرطوب‌سازی هیدروژن استفاده شود که در این صورت چرخه اتفاق نمی‌افتد. شکل (۱) شماتیکی از سیستم چرخه‌ای در مرطوب‌سازی هوا را نشان می‌دهد.



شکل ۱ سیستم مرطوب‌سازی چرخه‌ای

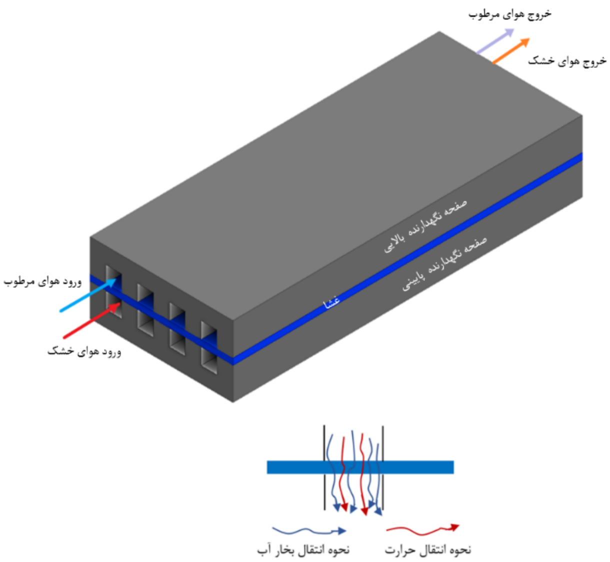
در زمینه مدل‌سازی مرطوب‌سازهای غشایی مطالعات زیادی انجام شده است. فلوریان ولفنستتر و همکاران [12] با مطالعه غشاهای مختلف در یک مرطوب‌ساز به این نتیجه رسیدند که رطوبت نسبی بیشترین تاثیر را بر نفوذ آب از غشا دارد. افزایش دما نیز موجب کاهش جذب آب توسط غشا می‌شود. هی‌جین‌چو و همکاران [13] یک مرطوب‌ساز غشایی با غشای فیبر توخالی را بررسی کردند. سیستم پیشنهادی آنها بار تهویه هوای ساختمان را در تابستان و زمستان به ترتیب ۲۹/۸ و ۱۶/۸ درصد کاهش می‌دهد. فیروزجایی و همکاران [14] یک مرطوب‌ساز غشایی صفحه‌ای را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش دمای سمت مرطوب از ۵۰ به ۸۰ درجه سلسیوس دمای گاز خروجی افزایش می‌یابد و سرعت انتقال بخار غشا سه برابر می‌شود. هاشمی و همکاران [15] یک مرطوب‌ساز غشایی را به صورت سه بعدی مدل‌سازی کردند. آنها

دریافتند که افزایش تخلخل، نفوذپذیری و دما در طرف‌های خشک و مرطوب و کاهش ضخامت غشا، باعث افزایش جریان جرمی ورودی بخار آب و بهبود عملکرد مرطوب‌ساز می‌شود. نگیا ووآ و همکاران [16] یک مرطوب‌ساز غشایی را مدل‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش رطوبت نسبی، دما و سرعت جریان در سمت مرطوب نرخ انتقال جرم از غشا افزایش می‌یابد. آنها در مطالعه‌ای دیگر [17] دریافتند که بالاترین عملکرد مرطوب‌ساز در نرخ جریان ثابت سمت مرطوب و خشک رخ می‌دهد. ژان و همکاران [18] یک مرطوب‌ساز غشایی را مدل-سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که فشار عملیاتی با نرخ انتقال آب نسبت معکوس دارد. لی و همکاران [19] انتقال حرارت و رطوبت نسبی در یک مرطوب‌ساز غشایی با غشاهای کاغذی مبتنی بر سلولز و غشاهای پلیمری مصنوعی را بررسی کردند. آنها دریافتند که استفاده از غشاهای استات مبتنی بر سلولز و غشاهای پلیمری مصنوعی با استفاده از مواد کامپوزیتی و افزودنی‌های آبدوست، بهبود زیادی در انتقال رطوبت دارد. یان و همکاران [20] یک مرطوب‌ساز غشایی را با ضخامت غشاهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که با افزایش ضخامت غشا مقاومت غشا در برابر انتقال جرم و حرارت افزایش می‌یابد. شمسی‌زاده و همکاران [21] مرطوب‌ساز غشایی با کانال-های گازی شکل را همراه با موانع در هر دو سمت خشک و مرطوب بررسی کردند و نتیجه گرفتند دمای خروجی سمت خشک نسبت به بدون مانع حدود ۴ درجه افزایش می‌یابد. بهارلو و افشاری [22] غشا و قطر هیدرولیکی کانال‌ها را در یک مرطوب‌ساز غشایی بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد افزایش ضخامت غشا منجر به کاهش نقطه شبنم در خروجی سمت خشک می‌شود. همچنین غشای پهن عملکرد مرطوب‌ساز را افزایش می‌دهد و قطرهای هیدرولیکی بزرگ توصیه نمی‌شود. حسن‌زاده و همکاران [23] یک رطوبت‌زن غشایی پوسته لوله از نوع گاز – گاز را در حالت دائمی مدل‌سازی کردند. نتایج نشان می‌دهد که نرخ انتقال حرارت و انتقال جرم در جریان مخالف بیشتر از جریان موازی است.

در مطالعات گذشته مرطوب‌سازهای هوا–هوا مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ در این مطالعه به انتقال حرارت و رطوبت مرطوب-ساز صفحه‌ای هوا – هیدروژن پرداخته شده است. همچنین، پارامترهای موثر (دمای نقطه شبنم در خروجی سمت خشک، نرخ انتقال آب از میان غشا، نسبت بازیابی رطوبت) بر عملکرد مرطوب‌ساز غشایی در کاربرد پیل‌سوختی بررسی شده‌اند و به کمک مدل‌سازی عددی این دو مرطوب‌ساز، عملکرد آنها در دبی‌های مختلف سمت خشک و مرطوب با یکدیگر مقایسه شده است.

مدل‌سازی مرطوب‌ساز

شماتیکی از مرطوب‌ساز غشایی مدل‌سازی شده با کانال‌های موازی در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق شکل (۲)؛ جریان سرد و خشک (هوا یا هیدروژن) و جریان گرم و مرطوب (هوا) از کانال‌های قرار گرفته در طرفین غشا عبور داده می‌شود. به دلیل اختلاف دما و غلظت و فشار موجود در دو طرف غشا، انتقال جرم (آب) و انتقال انرژی (گرما) از سمت کانال‌های گرم و مرطوب و از طریق غشا به سمت کانال‌های سرد و خشک انجام می‌شود. مشخصات هندسی و پارامترهایی که بر عملکرد این مدل موثر هستند؛ در جدول (۲) ارایه شده است.



شکل ۲ شماتیکی از مرطوب‌ساز مدل‌سازی شده

جدول ۲ مشخصات هندسی و شرایط عملکردی مرطوب‌ساز [24]

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
طول مرطوب‌ساز	L	mm	۱۰۰
عرض مرطوب‌ساز	W	mm	۱۸
ارتفاع مرطوب‌ساز در هر سمت	H	mm	۴
ارتفاع کانال	h	mm	۲
عرض کانال	w	mm	۲
فاصله کانال‌ها از یکدیگر	d	mm	۲
ضخامت غشا	t	μm	۱۲۷
مساحت غشا	A	mm^2	۲۰۰
ضریب هدایت حرارتی غشا	K	$W.m^{-1}K^{-1}$	۲
چگالی غشا خشک	-	$kg.m^{-3}$	۱۹۸۰
وزن معادل غشا	-	$kg.mol^{-3}$	۱/۱
ضریب پخش آب در هوا	D	$m^2.s$	$۲/۲۳۶\times۱۰^{-۵}$
ضریب پخش آب در هیدروژن	D	$m^2.s$	$۵/۴۵۷\times۱۰^{-۵}$
لزجت هوا	M	Pa.s	$۰/۸۸۳\times۱۰^{-۵}$
لزجت هیدروژن	M	Pa.s	$۱/۸۸\times۱۰^{-۵}$
نفوذپذیری هوا در غشا	k	m^2	۱×۱۰^{-۱۲}
نفوذپذیری هیدروژن در غشا	k	m^2	۱×۱۰^{-۸}
ضریب تخلخل غشا	ε	-	۰/۵

مفروضات

در این تحقیق فرض شده که جریان در مرطوب‌ساز تک فاز است تا از پیچیدگی‌های جریان دو فازی کاسته شود. همچنین برای این مدلسازی مفروضات زیر در نظر گرفته شده است.

۱. جریان در کانال‌ها آرام(عدد رینولدز کمتر از ۲۳۰۰)، دائم، تراکم‌ناپذیر(عدد ماخ کمتر از ۰/۳) و کاملا توسعه یافته (کانال‌ها با طول زیاد) است.

۲. هوا گاز ایده‌آل است.

۳. مرطوب‌ساز عایق است و حرارت فقط از طریق غشا منتقل می‌شود.

۴. غشا همگن است و تنها بخار آب را عبور می‌دهد و نسبت به سایر گازها نفوذناپذیر است.

۵. انرژی جنبشی و پتانسیل گازها و نیروی گرانش زمین ناچیز فرض شده است.

معادلات حاکم، روش حل عددی

بر اساس مفروضات بیان شده، معادلات حاکم بر مرطوب‌ساز غشایی شامل معادلات بقا جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها می‌باشد. اگر F، G و H به شکل بردارهای ستونی بیان شوند؛ همه معادلات به فرم کلی معادله (۱) نوشته می‌شوند [25].

$$\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial y}+\frac{\partial H}{\partial z}=J \quad (۱)$$

در معادله بالا؛ بردارهای ستونی F، G و H ترم‌های شار یا بردارهای شار و J ترم چشمه است. این ترم‌ها توسط معادلات (۲) تا (۵) به دست می‌آیند [21].

$$F=\begin{Bmatrix}\rho\varepsilon u\\ \rho\varepsilon u^{۲}+P\varepsilon\\ \rho\varepsilon uv\\ \rho\varepsilon uw\\ \rho\varepsilon u\\ \rho\varepsilon uC_pT-k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x}\\ \rho\varepsilon uC^iT-D_{eff}^i\frac{\partial C_i}{\partial x}\end{Bmatrix} \quad (۲)$$

$$G=\begin{Bmatrix}\rho\varepsilon v\\ \rho\varepsilon uv\\ \rho\varepsilon v^2+P\varepsilon\\ \rho\varepsilon wv\\ \rho\varepsilon vC_pT-k_{eff}\frac{\partial T}{\partial y}\\ \rho\varepsilon vC^iT-D_{eff}^i\frac{\partial C_i}{\partial y}\end{Bmatrix} \quad (۳)$$

$$H=\begin{Bmatrix}\rho\varepsilon w\\ \rho\varepsilon uw\\ \rho\varepsilon vw\\ \rho\varepsilon w^{۲}+P\varepsilon\\ \rho\varepsilon wC_pT-k_{eff}\frac{\partial T}{\partial z}\\ \rho\varepsilon wC^iT-D_{eff}^i\frac{\partial C_i}{\partial z}\end{Bmatrix} \quad (۴)$$

$$J=\begin{Bmatrix}0\\ \frac{-\mu}{K}u\\ \frac{-\mu}{K}v\\ \frac{-\mu}{K}w\\ 0\\ 0\end{Bmatrix} \quad (۵)$$

در معادلات (۲) تا (۵)، P، T، ρ، μ و C_p به ترتیب برابر است با فشار و دما، چگالی، ویسکوزیته و ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط گاز در کانال‌ها است. همچنین u، v و w مولفه‌های سرعت در راستا محورهای x، y و z است. ε و K به ترتیب ضریب تخلخل و ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل (غشا) است که در این مدل‌سازی ضریب تخلخل برای کانال‌ها برابر ۱ و برای

غشا با توجه به نوع غشا مشخص می‌شود. k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر است که در کانال‌ها مربوط به مخلوط هوای خشک و مرطوب و در غشا از رابطه (۶) به دست می‌آید [26].

$$K_{eff} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon}{2K_m}+\frac{\varepsilon}{2K_m+K_w}} - 2K_m \quad (۶)$$

در رابطه بالا، k_m و k_w به ترتیب ضریب هدایتی غشا و بخار آب است.

در معادله (۲) تا (۵)، C^i غلظت جز i و D^i_{eff} ضریب پخش موثر گونه i در مخلوط گاز است. لازم به ذکر است که ضریب پخش موثر گونه i در غشا و کانال‌ها به ترتیب از معادله‌های (۷) و (۸) بدست می‌آید [26].

$$D^i_{eff} = \varepsilon^{1.5} D^i \quad (۷)$$

$$D^i = D_{\cdot} \left(\frac{T}{T_{\cdot}}\right)^{1.5} \left(\frac{P_{\cdot}}{P}\right) \quad (۸)$$

در معادلات (۷) و (۸)، P_0 و T_0 به ترتیب فشار و دما اولیه می‌باشد. D^i ضریب پخش جز i در مخلوط گاز و D_0 ضریب پخش گونه در دما و فشار اولیه می‌باشد. همچنین ضریب پخش آب در غشا نیز از رابطه (۹) بدست می‌آید [26].

$$D_m^{H_2O} = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1).\, e^{\left(-\frac{2346}{T}\right)} \text{for } 0 < \lambda \le 3 \\ 4.17 \times 10^{-8} \lambda (1 + 161 e^{-\lambda}).\, e^{(-2346/T)} \text{otherwise} \end{cases} \quad (۹)$$

که λ محتوی آب غشا است و از رابطه (۱۰) بدست می‌آید [27].

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 \text{ for } 0 < a \le 1 \\ 14 + 1.4(a-1) \text{ for } 1 < a \le 3 \end{cases} \quad (۱۰)$$

همچنین a فعالیت بخار آب در غشا است و از رابطه (۱۱) بدست می‌آید [28].

$$a = \frac{C^{H_2O} RT}{P_{sat}} \quad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱)، P_{sat}، C^{H_2O} و R به ترتیب فشار اشباع، غلظت آب و ثابت گاز در غشا می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود [29].

$$C^{H_2O} = \frac{\lambda \rho_{m,dry}}{W_{m,dry}} \quad (۱۲)$$

در رابطه (۱۲) $\rho_{m,dry}$ دانسیته خشک غشا و $w_{m,dry}$ وزن معادل خشک غشا می‌باشد. همچنین در رابطه (۱۲)، P_{sat} فشار اشباع می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید [30].

$$p_{sat} = 0.61078 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (۱۳)$$

که T دما، برحسب درجه سلسیوس می‌باشد و P برحسب کیلوپاسکال می‌باشد. همچنین رطوبت نسبی و دمای خروجی سمت خشک مطابق رابطه زیر به نقطه شبنم تبدیل می‌شوند [30].

$$p_{sat,(T=\text{Dew Point})} = p_{sat,(T=dry,out)} \times \phi_{dry,out} \quad (۱۴)$$

عملکرد مرطوب‌ساز با عبارت‌های نرخ انتقال بخار آب، نسبت بازیافت آب، اختلاف نقطه شبنم و رطوبت نسبی خروجی سمت خشک مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که این پارامترها به هم وابسته هستند.

نرخ انتقال بخار آب از سمت مرطوب به خشک از طریق غشا از رابطه زیر به دست می‌آید [31].

$$WVTR = \dot{m}_{v,dry,out} - \dot{m}_{v,dry,in} \quad (۱۵)$$

در معادله (۱۵)، $\dot{m}_{v,dry,out}$ و $\dot{m}_{v,dry,in}$ به ترتیب دبی جرمی آب در خروجی سمت خشک و دبی جرمی آب در ورودی سمت خشک می‌باشند. به عنوان نمونه $\dot{m}_{v,dry,out}$ به صورت زیر است [30].

$$\dot{m}_{v,dry,out} = \omega_{dry,out} . \dot{m}_{a,dry} \quad (۱۶)$$

که رابطه (۱۶) $\dot{m}_{a,dry}$ دبی جرمی هوا در سمت خشک و $\omega_{dry,out}$ نسبت رطوبت است که از رابطه (۱۷) به‌دست می‌آید [28].

$$\omega_{dry,out} = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (۱۷)$$

در بسیاری از شرایط، ورودی سمت مرطوب کاملا اشباع است. این موضوع باعث می‌شود با تغییر دبی ورودی سمت مرطوب و دمای آن، دبی جرمی جریان بخار آب ورودی از سمت مرطوب نیز تغییر کند. به همین دلیل استفاده از WVTR شاخص کاملی جهت مقایسه در دبی‌های مختلف نیست. از این رو می‌توان به بررسی نسبت آب انتقال یافته به حداکثر آب موجود برای انتقال پرداخت. به همین منظور از شاخصی بی‌بعد به نام نسبت بازیافت آب استفاده می‌شود. عبارت بدون بعد نسبت بازیافت آب (WRR) به‌صورت زیر تعریف می‌شود [31].

$$WRR = \frac{WVTR}{\dot{m}_{v,wet,in}} \quad (۱۸)$$

در این رابطه، $\dot{m}_{v,wet,in}$ دبی جرمی آب در ورودی سمت مرطوب است.

مدل‌سازی توسط نرم‌افزار فلوئنت انجام شده و گسسته‌سازی معادلات با روش حجم محدود، معادلات حاکم بر مرطوب‌ساز با شرایط مرزی تعیین شده، حل گردیده است. با استفاده از الگوریتم سیمپل میدان‌های سرعت و فشار به دست آمده‌اند. برای فشار از گسسته‌سازی مرتبه دوم و برای سرعت از روش بالادستی مرتبه دوم استفاده شده است. همچنین برای محتوای آب از روش گسسته‌سازی بالادستی مرتبه اول استفاده شده است. به علت کوپل بودن معادلات غیرخطی حاکم و تأثیر چشم‌گیر پارامترهای انتقال روی خواص فیزیکی مانند دما، ویسکوزیته و غلظت، از یک روند تکراری برای حل دستگاه معادلات تا رسیدن به همگرایی استفاده شده و دقت همگرایی $۱۰^{-۵}$ در نظر گرفته شده است. به منظور حل معادلات به روش عددی، از روش تک ناحیه ای استفاده شده است و به این دلیل شروط مرزی تنها برای مرزهای بیرونی مشخص و عایق در نظر گرفته شده‌اند. جریان در مرزهای خارجی به‌صورت توسعه یافته و یا شار صفر با فشار برگشتی در نظر گرفته می‌شود. شرط عدم لغزش روی تمامی دیواره‌های در تماس با جریان اعمال شده است و دیواره‌ها در مقابل عبور گاز نفوذناپذیر هستند. در شرایط بیان شده، با حل دستگاه معادلات سرعت، فشار، دما و غلظت اجزا محاسبه می-شوند.

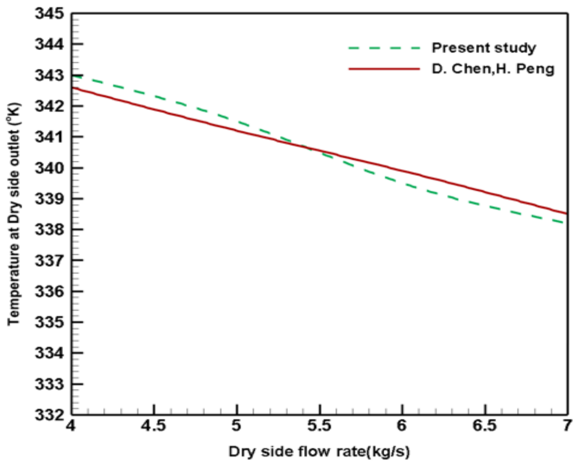
جدول (۳) نشان می‌دهد که با افزایش تعداد شبکه دقت حل افزایش پیدا می‌کند. با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی تا ۱۸۰۰۰۰ سلول، نتیجه‌ی حل عددی مستقل از تعداد شبکه می-شود.

جدول ۳ بررسی استقلال حل از شبکه

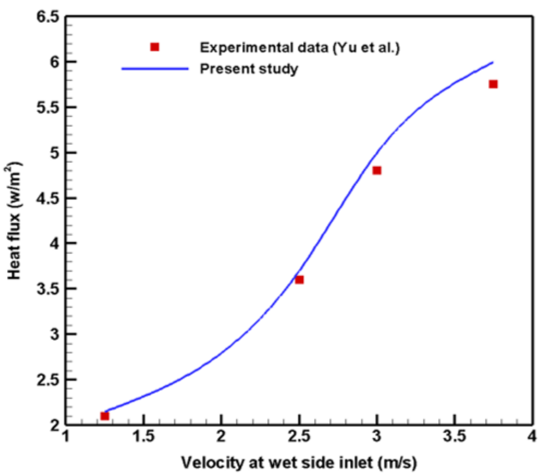
درصد جرمی آب در خروجی سمت خشک	تعداد سلول‌های محاسباتی
۰/۵۷۲۶۲	۸۰۰۰۰
۰/۰۱۴۸۵	۱۳۰۰۰۰
۰/۰۱۸۱	۱۸۰۰۰۰
۰/۰۱۸۳	۲۰۰۰۰۰

اعتبارسنجی

برای اطمینان از روش حل عددی، باید یکی از پارامترهای مهم در مرطوب‌ساز مورد بررسی قرار گیرد. مطابق شکل (۳-الف) دمای خروجی سمت خشک با نتایج عددی مطالعه چن و پنگ مقایسه شده است. در دبی‌های مختلف سمت خشک نشان داده شده، بین مطالعه حاضر و نتایج چن و پنگ [32] مطابقت خوبی برقرار است و نشان‌دهنده درستی روند حل است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین درصد خطا ۰/۹ درصد است. همچنین شکل (۳-ب) نتایج این مطالعه و مطالعه تجربی یو و همکاران [10] با انتخاب مقدار شار حرارتی به عنوان یک معیار اعتبارسنجی مقایسه شده است. از شکل (۳-ب) مشاهده می‌شود که تطابق زیادی بین مطالعه حاضر و مطالعه تجربی وجود دارد. تفاوت بین نتایج در سرعت بالاتر در سمت کانال‌های مرطوب به دلیل نادیده گرفتن اشباع آب است. حداکثر خطا کمتر از ۴/۲ درصد در بالاترین سرعت در سمت کانال‌های مرطوب بررسی شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳ (الف) مقایسه تغییرات دمایی خروجی در سمت خشک مربوط به مطالعه چن و پنگ [32] و مطالعه حاضر، (ب) مقایسه شارحرارتی خروجی در سمت خشک مربوط به نتایج تجربی یو و همکاران [10] و مطالعه حاضر

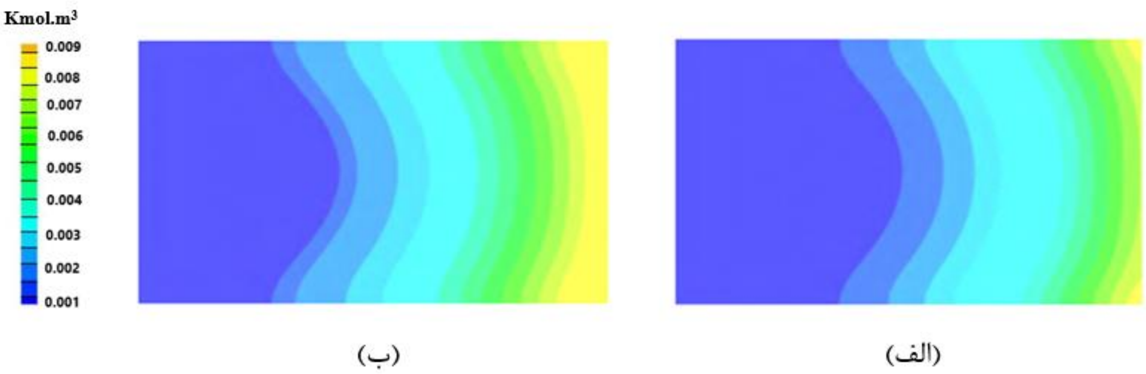
نتایج

شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) به ترتیب کانتور انتقال آب در صفحه‌ای مجازی در مرکز غشا و به موازات کانال‌ها در دو نوع مرطوب‌ساز غشایی هوا-هوا و هیدروژن- هوا نشان می‌دهد.

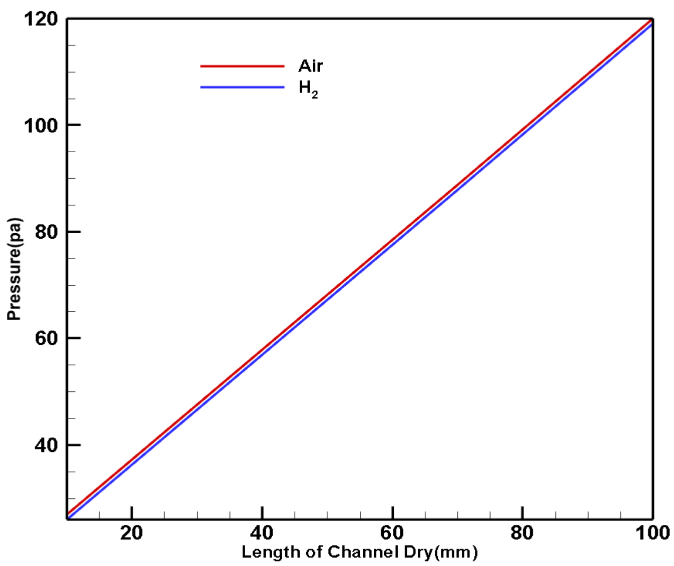
به دلیل این‌که ضریب نفوذ هیدروژن در بخار آب حدود دو برابر هوا در بخارآب است؛ از این‌رو در سمت خشک بخار آب سریع‌تر در هیدروژن نفوذ می‌کند لذا گرادیان غلظت در دو سمت غشاء سمت هیدروژن بیشر بوده و بخار بیشتری انتقال می‌یابد. مطابق شکل (۴)، در یک موقعیت مکانی یکسان روی صفحه مجازی در مرکز غشا، نرخ انتقال آب از سمت غشا در مرطوب-ساز هیدروژن- هوا بیشتر از مرطوب‌ساز هوا - هوا است.

شکل (۵) افت فشار را در کانال‌های سمت خشک مرطوب-ساز هوا - هوا و مرطوب‌ساز هیدروژن - هوا با دمای گاز خشک و مرطوب به ترتیب ۳۰۰ و ۳۳۰ کلوین با دبی ۳۰ میلی‌گرم بر ثانیه را نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است؛ به دلیل حرکت سیال در طول کانال‌ها، در کانال‌های خشک هر دو مرطوب‌ساز افت فشار به وجود می‌آید. لازم به ذکر است که در دبی پایین افت فشار ۲۷ پاسکال است و در دبی‌های بالاتر به ۱۲۰ پاسکال می‌رسد. افت فشار برای هر دو سیال هوا و هیدروژن در همه دبی‌ها تقریبا یکسان است.

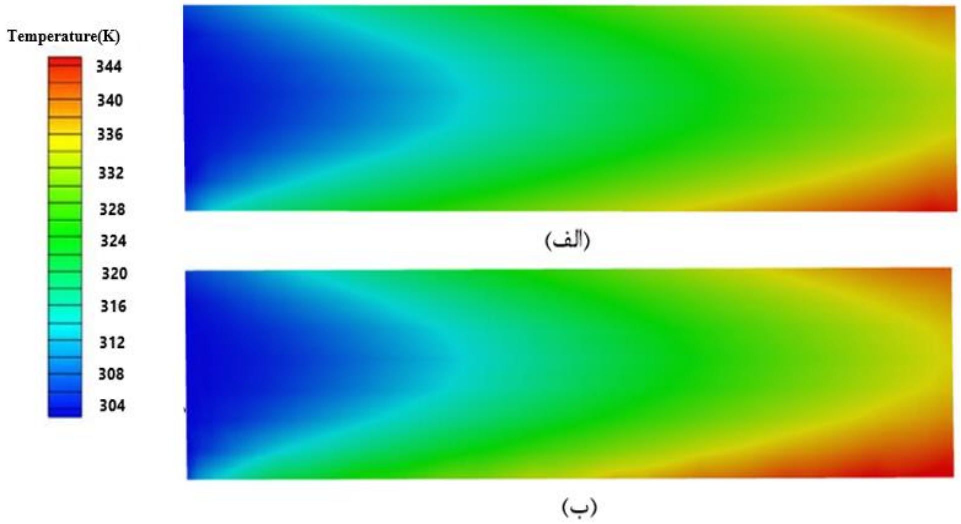
شکل‌های (۶-الف) و (۶- ب) توزیع دما را از ابتدا تا انتهای کانال‌های خشک هر دو مرطوب‌ساز هوا-هوا و هیدروژن- هوا نشان می‌دهند. مطابق شکل (۶)، هوای خشک و مرطوب به ترتیب با دمای ۳۰۰ و ۳۳۰ کلوین وارد مرطوب‌ساز می‌شوند و به دلیل اختلاف دما، سبب انتقال حرارت از طریق غشا از سمت کانال‌های گرم و مرطوب به طرف کانال‌های سرد و خشک می‌شود. این انتقال حرارت سبب نزدیک شدن دمای خروجی سمت خشک به دمای ورودی سمت مرطوب می‌شود. همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است؛ دما در انتهای کانال‌ها به ۳۴۲ کلوین هم می‌رسد.



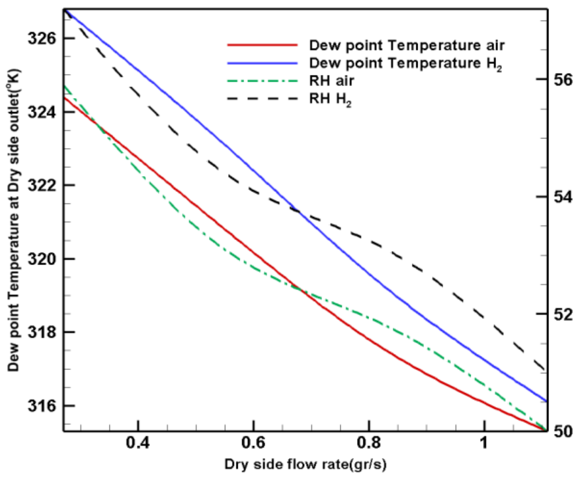
شکل ۴ غلظت آب در صفحه مرکزی غشا (الف) مرطوب‌ساز هوا -هوا، (ب) مرطوب‌ساز هیدرژون - هوا



شکل ۵ افت فشار در کانال‌های سمت خشک مرطوب‌ساز هوا – هوا و مرطوب‌ساز هیدرژون - هوا



شکل ۶ توزیع دما در طول کانال‌های خشک (الف) هوا- هوا (ب) هیدروژن- هوا



شکل ۷ تاثیر دبی سمت خشک بر دمای نقطه شبنم و رطوبت نسبی خروجی

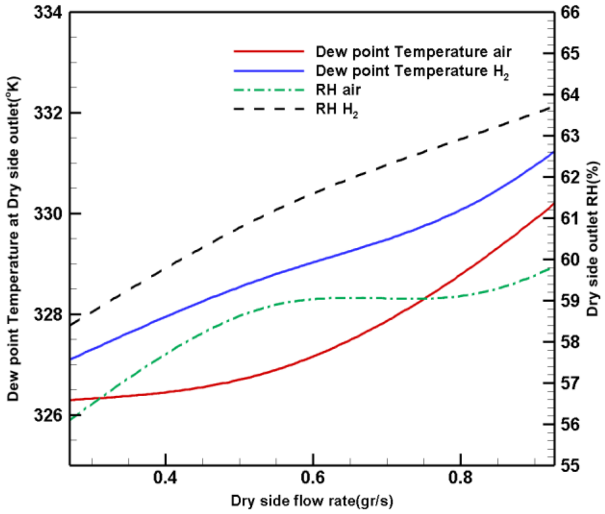
شکل (۷) تاثیر دبی سمت خشک بر دمای نقطه شبنم و درصد رطوبت نسبی خروجی سمت خشک را در یک دبی ثابت سمت مرطوب در مرطوب‌ساز غشایی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۷)، در هر دو نوع مرطوب‌ساز با افزایش دبی سمت خشک، میزان رطوبت و دمای نقطه شبنم خروجی سمت خشک کاهش می‌یابد. با افزایش دبی هوا یا هیدروژن سمت خشک، چون دبی سمت مرطوب ثابت است؛ آب انتقالی از سمت مرطوب نیز ثابت است و از این‌رو رطوبت سمت خشک کاهش می‌یابد. افزایش دبی سمت خشک در هر دو مرطوب‌ساز منجر به کاهش دمای خروجی در سمت خشک برای هر دو مرطوب‌ساز می‌شود. اما دمای نقطه شبنم و رطوبت خروجی سمت خشک در یک دبی ثابت در سمت خشک در مرطوب‌ساز هیدروژن - هوا نسبت به مرطوب‌ساز هوا–هوا بیشتر است. به عبارتی با یک دبی مشخص در دو سمت مرطوب و خشک، رطوبت نسبی و دمای گاز خروجی از سمت خشک در مرطوب‌ساز هیدروژن - هوا بالاتر است. یا اگر بخواهید هر دو مرطوب‌ساز در سمت خشک دما و رطوبت یکسانی داشته باشند؛ در مرطوب‌ساز هیدروژن - هوا به میزان آب کمتری نیاز است.

شکل (۸)، تاثیر دبی سمت مرطوب بر دمای نقطه شبنم و درصد رطوبت نسبی خروجی سمت خشک را در یک دبی ثابت سمت خشک در مرطوب‌ساز غشایی را نشان می‌دهد.

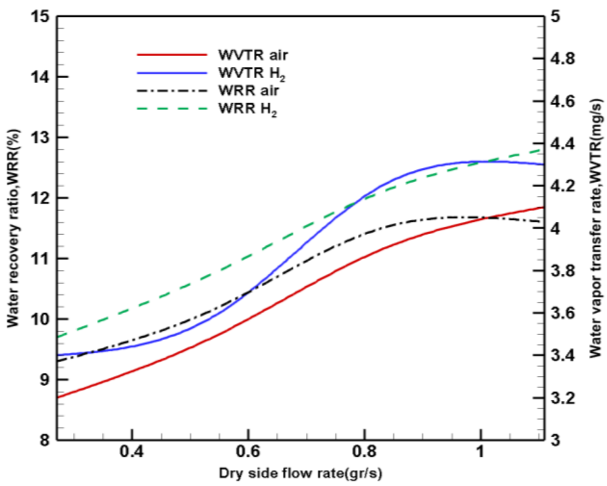
همان‌طور که از شکل (۸) مشخص است در هر دو مرطوب-ساز با افزایش دبی سمت مرطوب، میزان رطوبت و دمای نقطه شبنم خروجی سمت خشک افزایش می‌یابد. همچنین دمای نقطه شبنم و رطوبت خروجی سمت خشک در یک دبی ثابت در سمت مرطوب، در مرطوب‌ساز هیدروژن - هوا نسبت مرطوب-ساز هوا–هوا بیشتر است. به عبارتی دیگر برای یک رطوبت نسبی و دمای نقطه شبنم مشخص خروجی، در مرطوب‌ساز هیدروژن - هوا به میزان دبی کمتری از هوا در سمت مرطوب نیاز است.

شکل (۹) تاثیر دبی سمت خشک بر روی WVTR و WRR در دبی‌های خشک مختلف در دونوع مرطوب‌ساز هوا–هوا و هیدروژن - هوا را نشان می‌دهد. برای بررسی اثر دبی خشک، این دبی بین ۰٫۲۷ تا ۱٫۱۱ گرم بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است؛ در حالی که دبی هوا سمت مرطوب ثابت و برابر ۱٫۱۱ گرم بر ثانیه است. در همه دبی‌ها مرطوب‌ساز هیدروژن - هوا

نرخ انتقال آب و به تبع آن نسبت بازیافت آب بالاتری نسبت به مرطوب‌ساز هوا–هوا دارد. در دبی‌های مختلف سمت خشک، استفاده از مرطوب‌ساز هیدروژن – هوا سبب افزایش ۸ تا ۱۰ درصدی در مقدار نسبت بازیافت آب می‌شود. در هر دو مرطوب‌ساز با افزایش دبی سمت خشک، نرخ انتقال آب افزایش می‌یابد.

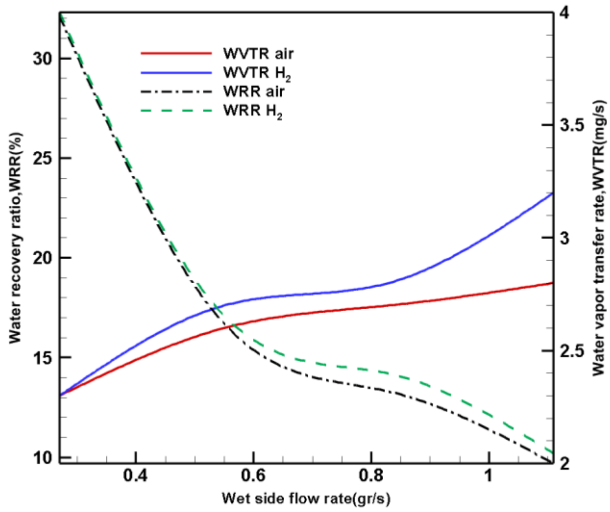


شکل ۸ تاثیر دبی سمت مرطوب بر دمای نقطه شبنم و رطوبت نسبی خروجی



شکل ۹ تاثیر دبی سمت خشک بر نرخ انتقال آب و نسبت بازیافت آب

مطابق شکل (۱۰) برای بررسی اثر دبی سمت مرطوب بر روی WVTR و WRR در دبی‌های مرطوب مختلف در دو نوع مرطوب‌ساز هوا–هوا و هیدروژن – هوا از دبی ۰/۲۷ گرم بر ثانیه در سمت خشک و دبی ۰/۲۷ تا ۱/۱۱گرم بر ثانیه در سمت مرطوب استفاده شده است. در همه دبی‌ها، مرطوب‌ساز هیدروژن– هوا نرخ انتقال آب و به تبع آن نسبت بازیافت آب بالاتری نسبت به مرطوب‌ساز هوا–هوا وجود دارد. در دبی‌های مختلف سمت مرطوب استفاده از هیدروژن به جای هوا در مرطوب‌ساز سبب افزایش ۲ تا ۸ درصدی مقدار نسبت بازیافت آب می‌شود. همچنین از شکل (۱۰) مشخص است که در دبی-های پایین‌تر در سمت مرطوب، نرخ انتقال آب و نسبت بازیافت آب در دو نوع مرطوب‌ساز تقریبا یکسان است. لازم به ذکر است که در هر دو مرطوب‌ساز، با افزایش دبی سمت مرطوب، نرخ انتقال آب افزایش می‌یابد؛ اما نسبت بازیافت آب کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰ تاثیر دبی سمت مرطوب بر نرخ انتقال آب و نسبت بازیافت آب

نتیجه‌گیری

در این مقاله به مدلسازی عددی دو مرطوب‌ساز غشایی هیدروژن – هوا و مرطوب‌ساز هوا–هوا و مقایسه آن‌ها از نظر میزان آب انتقالی از سمت مرطوب به سمت خشک و دمای نقطه شبنم پرداخته شده است. مهمترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است.

۱. در هر دو مرطوب‌ساز انتقال آب در ابتدای مسیر کم و با گذشت زمان و در طول کانال‌ها به دلیل انتقال حرارت از سمت گرم و مرطوب به سمت سرد و خشک دما در صفحه‌ی مرکزی غشا افزایش می‌یابد.

۲. به علت طولانی بودن مسیر کانال‌ها، کمترین و بیشترین افت فشار ۲۷ و ۱۲۰ پاسکال مربوط به ابتدا و انتهای کانال‌ها است.

۳. به علت اختلاف دما در طرفین غشا بیشترین دما مربوط به انتهای کانال‌های خشک است که برابر با ۳۴۲ کلوین است.

۴. در یک دبی ثابت در سمت مرطوب، با افزایش دبی سمت خشک، دمای نقطه شبنم و رطوبت خروجی در مرطوب‌ساز

هیدروژن - هوا نسبت به مرطوب‌ساز هوا–هوا بیشتر است. بیشترین دما نقطه شبنم و رطوبت خروجی به ترتیب برابر ۲ کلوین و ۴ درصد است.

۵. در یک دبی ثابت در سمت مرطوب، بیشترین اختلاف WVTR و WRR در مرطوب‌ساز هیدروژن - هوا و هوا–هوا برابر با ۱/۵و ۰/۴ است.

۶. در یک دبی ثابت در سمت خشک، بیشترین اختلاف WVTR و WRR در مرطوب‌ساز هیدروژن - هوا و هوا–هوا برابر با ۰/۸ و ۰/۵ است.

واژه نامه

مرطوب‌ساز غشایی	Membrane humidifier
مدیریت آب	Water management
غرقاب شدگی	Flooding
رسانایی یونی	Ionic conductivity
نفوذپذیری محیط متخلخل	Permeability of porous media
محتوی آب	Water content
نرخ انتقال بخار آب	Water vapour transfer rate
نسبت بازیافت آب	Water recovery ratio

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] J. Kim, S. Kim, H. Chun, J. Sim, S.-Y. Woo, S. Kang, and K. Min, "Comprehensive analysis of polysulfone membrane humidifier in hydrogen fuel cell vehicles: Experimental and theoretical approaches," *Journal of Membrane Science*, vol. 713, p. 123234, 2025. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123234

[2] L. Schoenfeld, M. Kreitmeir, F. Wolfenstetter, M. Neumann, H. Klein, and S. Rehfeldt, "Modeling mass and heat transfer in membrane humidifiers for polymer electrolyte membrane fuel cells," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 223, p. 125260, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125260

[3] K. Ramya, J. Sreenivas, and K. S. Dhathathreyan, "Study of a porous membrane humidification method in polymer electrolyte fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 22, pp. 14866–14872, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.088

[4] S. W. Perng, H. W. Wu, T. C. Jue, and K. C. Cheng, "Numerical predictions of a PEM fuel cell performance enhancement by a rectangular cylinder installed transversely in the flow channel," *Applied Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1541–1554, 2009. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.011

[5] D. L. Wood, J. S. Yi, and T. V. Nguyen, "Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells," *Electrochimica Acta*, vol. 43, no. 24, pp. 3795–3809, 1998. https://doi.org/10.1016/S0013-4686(98)00139-X

[6] G. Vasu, A. K. Tangirala, B. Viswanathan, and K. S. Dhathathreyan, "Continuous bubble humidification and control of relative humidity of H_2 for a PEMFC system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 17, pp. 4640–4648, 2008. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.051

[7] A. Casalegno, S. De Antonellis, L. Colombo, and F. Rinaldi, "Design of an innovative enthalpy wheel based humidification system for polymer electrolyte fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5000–5009, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.012

[8] D. Ilk, V. Frick, C. Hänel, T. Schiestel, M. Schoemaker, H. Kraus, and H. E. Hoster, "The impact of air contaminants on humidifier membrane performance," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 126, pp. 192–203, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.06.009

[9] V. K. Phan, X. L. Nguyen, Y. Choi, D. T. Le Tri, H. L. Nguyen, and S. Yu, "Water transport analysis of hollow fiber

membrane humidifier module using response surface method," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 49, p. 102453, 2024. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102453

[10] S. Yu, S. Im, S.-S. Kim, J. Hwang, Y.-D. Lee, S. Kang, and K.-Y. Ahn, "A parametric study of the performance of a planar membrane humidifier with a heat and mass exchanger model for design optimization," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 7–8, pp. 1344–1351, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.054

[11] B. J. Kim and M. S. Kim, "Studies on the cathode humidification by exhaust gas recirculation for PEM fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 5, pp. 4290–4299, 2012. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.103

[12] F. Wolfenstetter, M. Kreitmeir, L. Schoenfeld, H. Klein, M. Becker, and S. Rehfeldt, "Experimental study on water transport in membrane humidifiers for polymer electrolyte membrane fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 55, pp. 23381–23392, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.114

[13] H. J. Cho, S. Y. Cheon, and J. W. Jeong, "Experimental analysis on energy recovery ventilator with latent heat exchanger using hollow fiber membrane," *Energy Conversion and Management*, vol. 278, p. 116706, 2023. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116706

[14] V. Kord Firouzjaei, S. M. Rahgoshay, and M. Khorshidian, "Planar membrane humidifier for fuel cell application: Numerical and experimental case study," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 147, p. 118872, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118872

[15] S. Z. Hashemi-Valikboni, S. S. M. Ajarostaghi, M. A. Delavar, and K. Sedighi, "Numerical prediction of humidification process in planar porous membrane humidifier of a PEM fuel cell system to evaluate the effects of operating and geometrical parameters," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 141, no. 5, pp. 1687–1701, 2020. https://doi.org/10.1007/s10973-020-10058-6

[16] H. N. Vu, X. L. Nguyen, J. Han, and S. Yu, "A study on vapor transport characteristics in hollow-fiber membrane humidifier with empirical mass transfer coefficient," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 177, p. 121549, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121549

[17] H. N. Vu, X. L. Nguyen, and S. Yu, "A lumped-mass model of membrane humidifier for PEMFC," *Energies*, vol. 15, no. 6, p. 2113, 2022. https://doi.org/10.3390/en15062113

[18] X. L. Nguyen, H. N. Vu, and S. Yu, "Parametric understanding of vapor transport of hollow fiber membranes for design of a membrane humidifier," *Renewable Energy*, vol. 177, pp. 1293–1307, 2021. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.003

[19] J. Li, S. Shao, Z. Wang, G. Xie, Q. Wang, Z. Xu, L. Han, and X. Gou, "A review of air-to-air membrane energy recovery technology for building ventilation," *Energy and Buildings*, vol. 265, p. 112097, 2022. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112097

[20] W. Yan, X. Cui, X. Meng, C. Yang, Y. Liu, H. An, and L. Jin, "Effects of membrane characteristics on the evaporative cooling performance for hollow fiber membrane modules," *Energy*, vol. 270, p. 126873, 2023. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126873

[21] P. Shamsizadeh, E. Afshari, and M. Mosharaf-Dehkordi, "Design of membrane humidifier using obstacles in the flow channels for ventilator," *Applied Thermal Engineering*, vol. 196, p. 117265, 2021.

https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117265

[22] E. Afshari and N. B. Houreh, "An analytic model of membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cell," *Energy Equipment and Systems*, vol. 2, pp. 83–94, 2014.

[23] M. Baroutie Ardestanie, H. Hassanzadeh, and Y. Ahmadi Brogani, "Thermodynamics modeling of heat and vapor transfer in the shell-and-tube membrane humidifier: A gas-to-gas type," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 5, pp. 223–236, 2015. https://doi.org/10.22044/jsfm.2015.591

[24] S. M. Mousavi Zahed, M. Zahed, and E. Afshari, "Investigating the impact of polymer membrane characteristics on the performance of the membrane humidifier," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, pp. 17–32, 2023. https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81524.1174

[25] J. D. Anderson, *Governing equations of fluid dynamics*, in Computational Fluid Dynamics, J. F. Wendt, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1992, pp. 15–51. https://doi.org/10.1007/978-3-662-11350-9_2

[26] P. Shamsizadeh and E. Afshari, "Numerical modeling of a membrane humidifier for mechanical ventilation," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 132, p. 105931, 2022. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105931

[27] N. B. Houreh, H. Shokouhmand, and E. Afshari, "Effect of inserting obstacles in flow field on a membrane humidifier performance for PEMFC application: A CFD model," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 57, pp. 30420–30439, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.189

[28] V. K. Phan, X. L. Nguyen, Y. Choi, J. Woo, and S. Yu, "Experimental study on the mass transfer permeability of hollow fiber membranes for a humidifier in a proton exchange membrane fuel cell," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 157, p. 107725, 2024. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107725

[29] C. Lu, Y. Li, Z. Liu, H. Zhou, H. Zheng, and B. Chen, "Influence mechanisms of flow channel geometry on water transfer and pressure loss in planar membrane humidifiers for PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 91, pp. 38757–38773, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.049

[30] M. Ghaedamini, N. Baharlou-Houreh, E. Afshari, H. Shokouhmand, and N. Jahantigh, "Experimental investigation on the heat and water transfer enhancement in a membrane-based air-to-air humidifier at insulation condition," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 38, pp. 17010–17021, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.168

[31] N. B. Houreh, E. Afshari, H. Shokouhmand, and S. Asghari, "Numerical study and experimental validation on heat and water transfer through polymer membrane by applying a novel enhancement technique," *Journal of Energy Storage*, vol. 29, p. 101387, 2020. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101387

[32] D. Chen and H. Peng, "A thermodynamic model of membrane humidifiers for PEM fuel cell humidification control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 127, no. 3, pp. 424–432, 2005. https://doi.org/10.1115/1.1978910